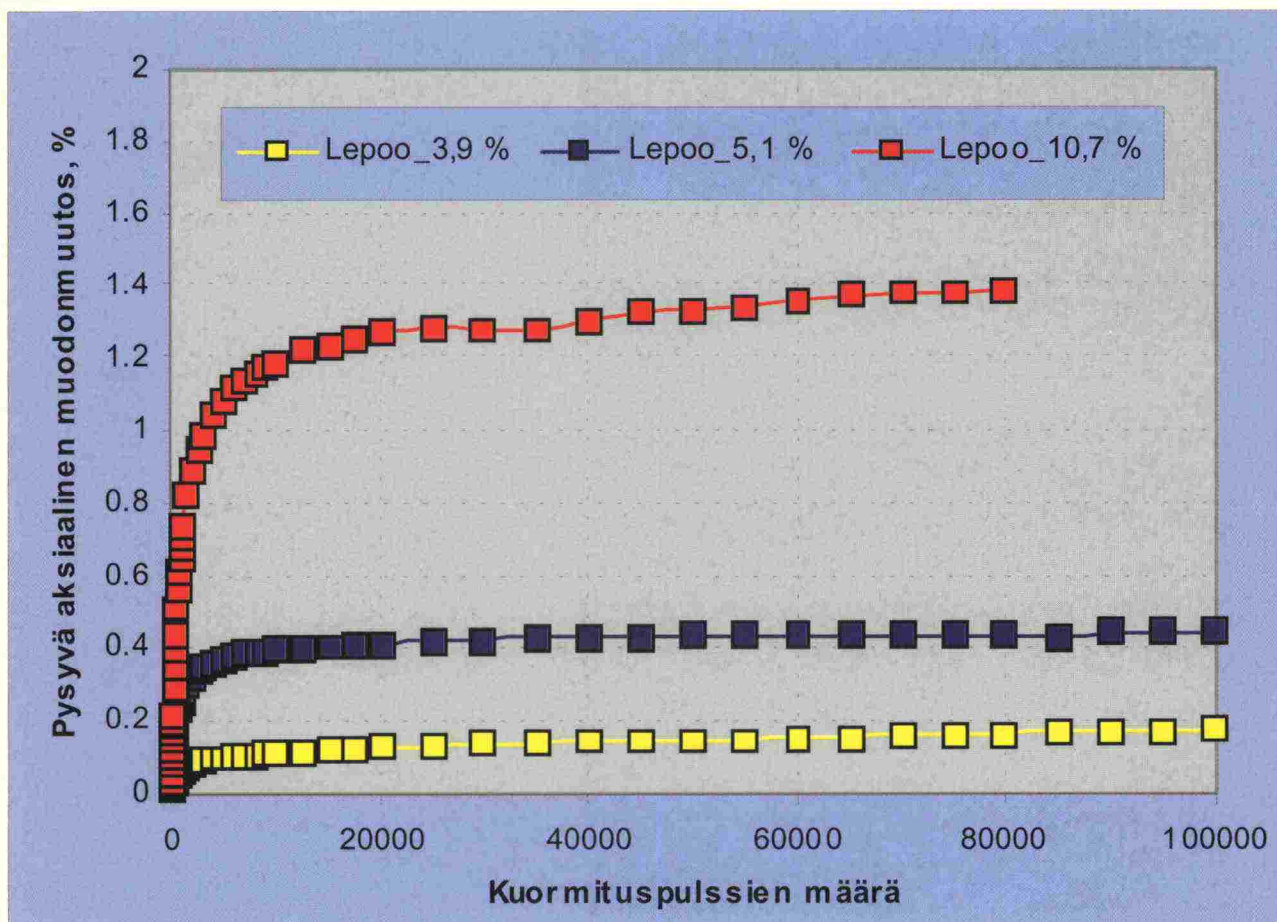


Timo Saarenketo, Pauli Kolisoja, Nuutti Vuorimies, Seppo Ylitapio

## Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet

Tiehallinnon selvityksiä 9/2001



Timo Saarenketo, Pauli Kolisoja, Nuutti Vuorimies, Seppo Ylitapio

# **Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet**

**Tiehallinnon selvityksiä 9/2001**

TIEHALLINTO

Helsinki 2001

ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-728-2  
TIEH 3200657

Oy Edita Ab  
Helsinki 2001

Julkaisua myy:  
Tiehallinto, julkaisumyynti  
telefaksi 0204 22 2652  
e-mail [julkaisumyynti@tiehallinto.fi](mailto:julkaisumyynti@tiehallinto.fi)



TIEHALLINTO  
Tie- ja liikennetekniikka  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelinvaihte 0204 22 150

**SAARENKETO, Timo, KOLISOJA, Pauli, VUORIMIES, Nuutti ja YLITAPIO, Seppo: Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet.**  
Helsinki 2001. Tiehallinto, tie- ja liikennetekniikka. Tiehallinnon selvityksiä 9/2001, 20 s.  
ISSN 1457-9871, ISBN 951-726-728-2, TIEL 3200657.

**Aiheluokka** 32, 56

**Asiasanat** Kantava kerros, kosteuspitoisuus, muodonmuutokset, murskeet, tutkimusmenetelmät

## **TIIVISTELMÄ**

Tielaitoksen toimeksiannosta suoritettiin vuosina 1996-2000 tutkimussarja, jonka tavoitteena oli selvittää sitomattomien ja sidottujen kantavan kerroksen materiaalien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia ja niitä mekaanisia, termodynaamisia, sähköisiä ja kemiallisia tekijöitä, jotka vaikuttavat näiden materiaalien mekaanisen käyttäytymisen vuodenaikaisvaihteluihin.

Pääosa tutkimuksista on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratoriossa, jossa on syklisen kolmiaksaalikokeiden, routanousukokeiden ja pitkäaikaisten syklisen toistokuormituskokeiden avulla tutkittu muun muassa näytteiden resiliient -moduuleja ja näytteissä toistuvan syklisen kuormituksen alaisena tapahtuvia pysyviä muodonmuutoksia. Testit tehtiin eri vuodenaikoina vallitsevia olosuhteita simuloiden kuivana, kosteana sekä jäädytys-sulatussyklin jälkeen. TTKK:n lisäksi tutkittaville materiaaleille on tehty Tube Suction -kokeet Lapin tiepiirin laboratoriossa ja murskeiden kemiallisia ominaisuuksia on tutkittu Oulun Yliopistossa.

Tutkimustulokset osoittivat selkeästi, että suomalaisten kantavan kerroksen murskeiden suurin ongelma on niissä roudan sulamisvaiheen aikana tapahtuvat pysyvät muodonmuutokset, jotka voivat kehittyä jo muutaman raskaan ajoneuvon ylityskerran aikana. Sen sijaan kaikkien tutkittujen murskeiden palautuvat muodonmuutosominaisuudet olivat suhteellisen hyvät, eivätkä niiden resiliient -moduulit alentuneet ratkaisevasti edes roudan sulamisvaihetta simuloivan sulatusvaiheen aikana.

Tutkimuksen tulosten perusteella murskeiden muodonmuutosominaisuuksiin näyttäisivät vaikuttavan erittäin merkittävästi niiden imupaineominaisuudet, joihin puolestaan vaikuttaa ennen muuta materiaalin hienoainesmäärä, mutta myös sen kemialliset ominaisuudet. Tube Suction -testi osoittautui ongelmallisten murskeiden tunnistamiseen sekä sopivan sideainetyypin ja -määrän selvittämiseen hyvin soveltuvaksi.

Emulsiobitumilla sidottujen murskeiden ominaisuudet eivät myöskään tutkimuksen tulosten perusteella näyttäisi välttämättä paranevan sideainepitoisuuden kasvaessa ja varsinkin materiaalin riittäväällä tiivistämisellä on ilmeisen suuri merkitys, kun halutaan estää stabiloituihin kerroksiin kehittyviä pysyviä muodonmuutoksia.



**Key words** Base course aggregate, permanent deformation, resilient modulus, water content, dielectric value, suction, seasonal variation

## **ABSTRACT**

On assignment from the Finnish National Road Administration (Finnra), a series of Research projects were carried out during 1996-2000 to examine strength and deformation properties of unbound and bound base course aggregates, as well as those mechanical, thermodynamic, electrical and chemical factors, which affect the seasonal variation of the mechanical behaviour of these materials.

A main part of the Research was done in the geotechnical laboratory at the Tampere University of Technology, where cyclic loading triaxial tests, frost heave test, and long lasting cyclic repeated loading tests were used to examine, for example the resilient modulus values and permanent deformations caused in the samples by cyclic loading. The tests were performed in situations simulating dry, moist, and post freeze-thaw cycle, seasonal conditions. In addition to the tests performed at TUT, Tube Suction tests were performed on the selected aggregates in the Lappi Region laboratory of Finnra, and chemical properties of the aggregates were examined at the University of Oulu.

The Research results show clearly that the most significant problem of Finnish base course aggregates is the Development of permanent deformations during frost thawing periods which can be caused by only a few passing heavy vehicles. Instead, the resilient properties of all tested aggregates were relatively good, and their resilient modulus values were not significantly lowered even during the thawing phase, which in the tests simulated the frost thawing period.

The results suggest, that suction properties of aggregates have a very significant effect on the deformation properties. Suction properties, in turn, result foremost from the fines content, but also from chemical properties of the aggregate. The Tube Suction test proved to function well in the identification of problematic aggregates and in defining appropriate binder types and their required amounts.

Further, the results suggest that the properties of aggregates bound with emulsified bitumen are not necessarily improved when binder content is increased, but sufficient compaction of the aggregate is apparently significant in avoiding permanent deformations in stabilised layers.

## ALKUSANAT

Lapin tiepiirissä aloitettiin 1980-luvun puolivälissä maatutkatekniikkaan liittyvä tutkimus- ja kehitystyö, josta merkittävä osa keskittyi aluksi selvittämään, miten tien rakennekerrosten materiaalien ja pohjamaan sähköiset ominaisuudet vaikuttavat maatutkasignaaliin ja myöhemmin 1990-luvulla voiko näiden sähköisten ominaisuuksien avulla arvioida myös materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. Näitä tutkimukset aloitettiin 1994-95 Texas Transportation Institutessa, jossa verrattiin Lapin ja Teksasin murskeiden sähköisiä ja muodonmuutosominaisuuksia ja joiden tulosten pohjalta tässä raportissa esiteltävä tutkimusohjelma aloitettiin.

Tässä julkaisussa on esitetty tiivistetyt yhteenvedot 1990-luvun puolivälissä aloitetusta sarjasta erillisiä tutkimusprojekteja, joiden tarkoituksena on ollut tutkia sitomattomien ja sidottujen kantavan kerroksen murskeiden vuodenaikaiskäyttäytymiseen vaikuttavia mekaanisia, sähköisiä ja termodynaamisia tekijöitä ja prosesseja. Julkaisu ilmestyy myös englanninkielisenä: Finnra reports 10/2001 Suction and deformation properties of base course aggregates, TIEH 3200647E. Tutkimuksia ovat tehneet Pauli Kolisoja ja Nuutti Vuorimies Tampereen teknillisessä korkeakoulussa, Teija Yliheikkilä Oulun yliopistossa, ja Seppo Ylitapio Lapin tiepiirin keskuslaboratoriossa ja konsultoinnin Oulun laboratoriossa. Tulosten analysoinneista ja raporttien kirjoittamisesta on pääosin vastannut Timo Saarenketo Roadscanners Oy:stä yhteistyössä Pauli Kolisojan ja Nuutti Vuorimiehen kanssa. Tutkimusprojektin rahoittajana ovat olleet Lapin ja Vaasan tiepiirit sekä projektin loppuvaiheessa myös Tiehallinto.

Tämän tutkimusohjelman toteuttaminen ei olisi ollut mahdollista ilman työn alkuvaiheessa Lapin ja Vaasan tiepiirien taholta saatua tukea, josta tekijät haluavat antaa erityiskiitoksen ao. piirien johdolle. Projektin ohjausryhmässä ovat tekijöiden lisäksi toimineet Arvo Lähde Vaasan tiepiiristä ja Tapani Lakala Lapin tiepiiristä, sekä Irma Saariniemi konsultoinnin Rovaniemen yksiköstä ja Hannu Peltoniemi Konsultoinnin Vaasan tiestötietopalveluista, joista viimeksi mainittu on myös ansiokkaasti toiminut työryhmän puheenjohtajana.

Joihinkin ohjausryhmän kokouksiin ovat lisäksi osallistuneet Teuvo Kasari Tielaitoksen konsultoinnin Tampereen yksiköstä ja Tom Scullion Texas Transportation Institutesta. Projektin loppuraportin toteutuksen on mahdollistanut Tielaitoksen tiehallinnon tuki, minkä lisäksi Kari Lehtonen tie- ja liikennetekniikka -yksiköstä on antanut arvokkaita neuvoja tämän raportin tekijöille.

Rovaniemellä ja Tampereella joulukuussa 2000

Tekijät

Helsingissä maaliskuussa 2001

Tiehallinto

Tie- ja liikennetekniikka

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	TUTKIMUSMATERIAALIT JA -MENETELMÄT	8
3	TUTKIMUSTULOKSET	9
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	17
5	KIRJALLISUUSVIITTEET	19



## 1 JOHDANTO

Sen jälkeen kun nastarenkaiden aiheuttama päällysteen urautuminen saatiin mittavan päällystetutkimusohjelman ansiosta hallintaan, on tien huonolaatuisessa kantavassa kerroksessa tapahtuvat palautumattomat muodonmuutokset muodostuneet erääksi suurimmaksi tien urautumisen aiheuttajaksi. Nämä muodonmuutokset voivat kehittyä lyhyessäkin ajassa, jos kantava kerros on kokonaan tai lähes kokonaan veden kyllästämä. Tällainen tilanne vallitsee Suomessa etenkin keväällä roudan sulamisvaiheessa, mutta myös satteisina syksyinä on huonolaatuisista kantavan kerroksen murskeista rakennettujen teiden todettu vaurioituneen nopeasti.

Keskeisen tekijän vaurioiden synnyssä uskotaan olevan murskeeseen dynaamisen akselikuormituksen ansiosta syntyvällä huokosveden ylipainella, joka alentaa maarakeiden välillä vaikuttavia tehokkaita jännityksiä. Koska materiaalin kyky vastusta kuormituksesta aiheutuvia muodonmuutoksia eli materiaalin kantavuus riippuu maarakeiden välisistä tehokkaista jännityksistä, edesauttaa huokosveden paineen kasvu materiaalin raerungossa tapahtuvien muodonmuutosten kehittymistä. Mitä suurempi on kuormituksen taso, sitä suurempia ovat myös palautumattomat muodonmuutokset.

Tämän projektin tarkoituksena oli selvittää kantavan kerroksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia olosuhteissa, jotka vastaisivat tien vuodenaikaisvaihteluja. Lisäksi tavoitteena oli testata ja kehittää menetelmiä, joilla ongelmalliset murskeet voitaisiin tunnistaa ja niiden stabilointiin tarvittava sideainemäärä suhteuttaa. Erityisesti tutkittiin materiaalien sähköisiä ominaisuuksia, kuten dielektrisyttä, mutta myös kemiallisia ja termodynaamisia ominaisuuksia ja niiden suhdetta mekaanisiin ominaisuuksiin. Yhdistävänä teoriana tutkimuksissa on ollut suction eli imupaineteoria, jossa Gibbsein vapaan energian vaihtelun avulla voidaan selittää maapartikkelien välissä vallitsevaa tehokasta jännitystä ja sitä, mikä on veden rooli eri vuodenaikoina murskeessa vallitsevissa olosuhteissa.

Imupaineteoriaa ja tämän tutkimusprojektin tuloksia on julkaistu tarkemmin seuraavissa julkaisuissa: Carpenter ja Lytton (1977), Fredlund ja Rahardjo (1993), Saarenketo (1995), Saarenketo ja Scullion (1996), Titus-Glover ja Fernando (1997), Saarenketo, Scullion ja Kolisoja (1998), Saarenketo (1999), Saarenketo et al. (2000a) ja Saarenketo et al. (2000b).



## 2 TUTKIMUSMATERIAALIT JA -MENETELMÄT

Tutkimusprojektin alkuvaiheessa vuosina 1996-97 tutkittiin Lapin tiepiirin laboratoriossa, Oulun yliopiston kemian laitoksella ja Tampereen teknillisessä korkeakoulussa lukuisia Lapin ja Vaasan alueen sora- ja kalliomurskeita, joista osan tiedettiin toimineen hyvin tierakenteissa ja osan tiedettiin aiheuttaneen runsaasti ongelmia. Hyviä murskeita edustivat mm. Tohmovaaran graniittimurske Kemijärveltä ja ongelmallisia Lampeltmossenin graniitti ja Vuorenmaan kiillegneissi Vaasan alueelta. Murskeille tehtiin imupainekokeet eli TS-testit (Saarenketo ja Scullion 1995, Scullion ja Saarenketo 1997, Ylitapio 1997, Saarenketo 2000) erilaisilla hienoainespitoisuuksilla 200 mm korkuisilla näytteillä. Oulun yliopiston kemian laitoksella tehdyissä kokeissa murskeiden < 2 mm:n fraktioista määritettiin kemiallinen ja mineraalikoostumus sekä määritettiin murskeiden uuttoliuoksista kationit. Lisäksi tutkittiin murskeiden kolloidien koostumusta (Yliheikkilä 1998).

Tampereen teknillisellä korkeakoululla vuonna 1997 tehdyissä kokeissa määritettiin murskeiden resilient -moduulit syklisellä kolmiaksiaalikokeella (Kolisoja 1997) SHRP P46 koemenetelmän mukaisesti 400 mm korkuisista kerroksittain tiivistetyistä näytteistä sekä kaksi viikkoa kestäneen 45°C lämpötilassa tapahtuneen kuivatuksen jälkeen että sen jälkeen kun näytteen oli annettu imeä pohjan kautta vettä viikon ajan. Tällä koetavalla pyrittiin määrittämään murskeiden kesä- ja syksyajan maksimi ja minimi- moduuliarvot.

Vuoden 1998 TTKK:n koesarjoihin otettiin mukaan jäädytys-sulatussykli, jonka aikana näytteistä mitattiin routanousut. Sulatuksen jälkeen näytteelle toistettiin syklinen kolmiaksiaalikoe, minkä lisäksi tehtiin  $10^5$  syklin aksiaalinen kuormitussarja, jolla pyrittiin simuloimaan roudan sulamisvaiheessa toistokuormituksen alaiseksi joutuvassa murskeessa tapahtuvia muodonmuutoksia. Tällä kertaa tutkittaviksi murskeiksi, joiden hienoainemäärää koesarjassa varioitiin, valittiin Lepoon intermediäärinen vulkaniittimurske, Vuorenmaan kiillegneissi- ja Ladesglon graniittimurskeet Vaasan alueelta sekä Vuontisrovan amfiboliitti- ja Tohmovaaran graniittimurskeet Lapista.

Vuoden 1999-2000 tutkimuksissa toistettiin TS-testit ja TTKK:lla vuoden 1998 koesarjoissa tehdyt kolmiaksiaalikokeet ongelmalliseksi todetuille Ladesglon ja Lepoon murskeille, jotka oli nyt stabiloitu erisuuruisia emulsiobitumimääriä käyttäen. Kokeiden tavoitteena oli selvittää millä bitumipitoisuudella murskeiden käyttäytymisessä todetut ongelmat voitiin välttää. Lisäksi vuosien 1999-2000 tutkimussarjassa testattiin Vuorenmaan sitomattomalla murskeella aksiaalisen kuormitustason vaikutusta jäädytys-sulatussyklin jälkeen materiaalissa tapahtuviin pysyviin muodonmuutoksiin sekä tutkittiin sitä, miten materiaalin dielektrisyysarvo muuttuu näytteessä tapahtuvien muodonmuutosten aikana.

Tutkitut materiaalit ja tutkimusmenetelmät on kuvattu tarkemmin asianomaisissa TTKK:n tutkimusraporteissa (Saarenketo et al. 2000a ja Saarenketo et al. 2000b).

### 3 TUTKIMUSTULOKSET

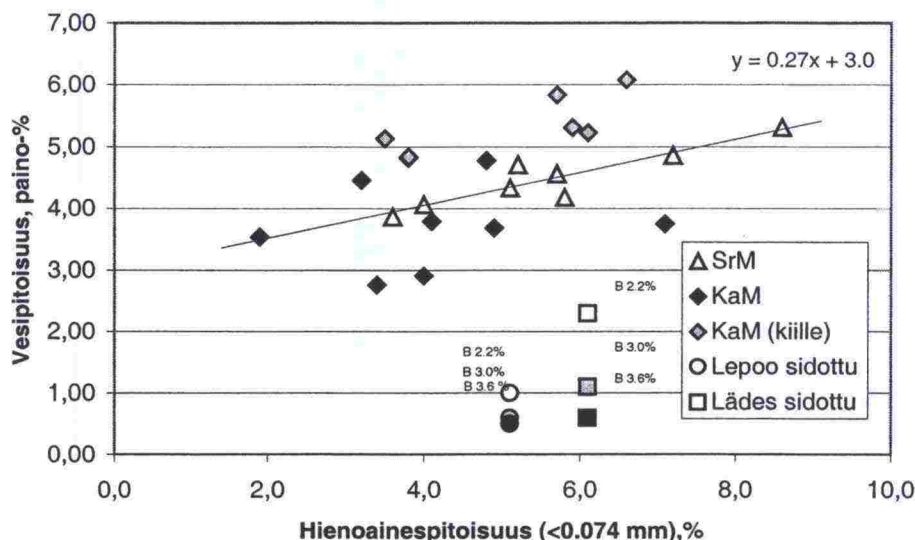
Projektin keskeisimmät tutkimustulokset näytteille tehtyjen TS-testien ja TTKK:n geotekniikan laboratoriossa vuosien 1998 ja 1999 aikana tehtyjen kolmiakσιαalikokeiden osalta on esitetty seuraavissa kuvissa. Kuvat 1-3 kuvaavat kallio- ja soramurskeilla eri rakeisuuksilla tehtyjen TS-testien tuloksia. Kuvissa on tarkasteltu hienoainespitoisuuden ja huokosluvun vaikutusta näytteen vesipitoisuuteen ja dielektrisyysarvoon, kuvassa 1 on mukana myös bitumilla stabiloidut näytteet.

Kuvat 4 ja 5 esittävät näytteiden resilient -moduuliarvoja, kun sykliset kolmiakσιαalikokeet on tehty a) kuivalla näytteellä, b) näytteellä, joka on saanut imeä vettä ja c) näytteellä, joka on läpikäynyt jäädytys-sulatussyklin. Muutujana näissä kuvissa on hienoainespitoisuus. Kuvassa 6 esitetään hienoainemäärään ja bitumilla stabiloitujen näytteiden bitumipitoisuuden suhdetta routasyklin aikana mitattuihin routanousuihin.

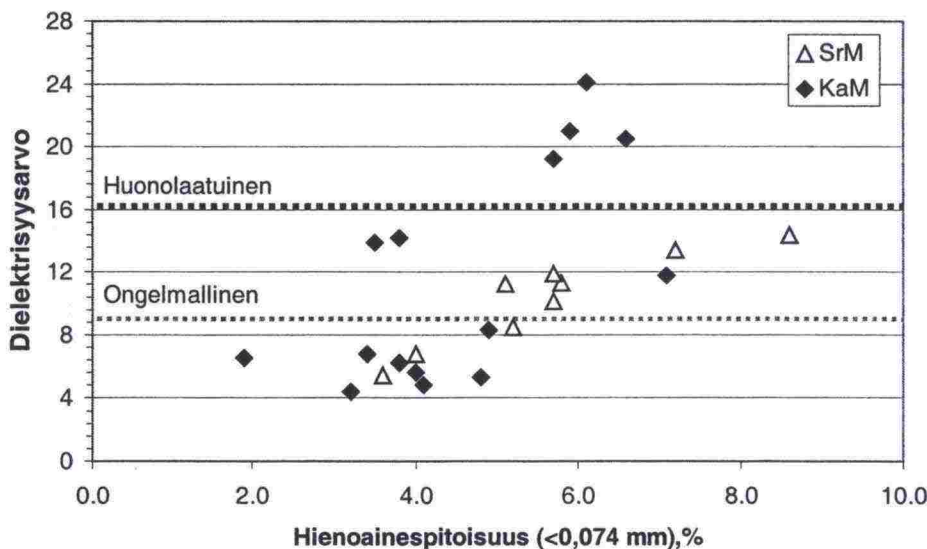
Kuvat 7 ja 8 esittävät hienoainemäärän ja aksiaalisen kuormituksen vaikutusta sulatusvaiheen jälkeen tehdyn syklisen kuormitussarjan aikana mitattuihin pysyviin muodonmuutosarvoihin. Kuvassa 7 on mukana myös bitumilla sidotuista näytteistä mitatut pysyvät muodonmuutokset 100 000 kuormitussyklin jälkeen. Kuvassa 9 on tarkasteltu imeytysvaiheen jälkeen mitatun näytteen pinnan dielektrisyysarvon suhdetta edellä mainittuihin muodonmuutosarvoihin.

Kuvissa 10-13 esitetään emulgoidulla bitumilla stabiloiduille näytteille tehtyjen kokeiden tuloksia. Kuvissa on tarkasteltu bitumipitoisuuden vaikutusta eri tavalla tiivistettyjen näytteiden tyhjätilaan, näytteeseen imeytyneen veden määrään, näytteiden resilient moduuliin sekä näytteistä mitattuihin pysyviin muodonmuutoksiin.

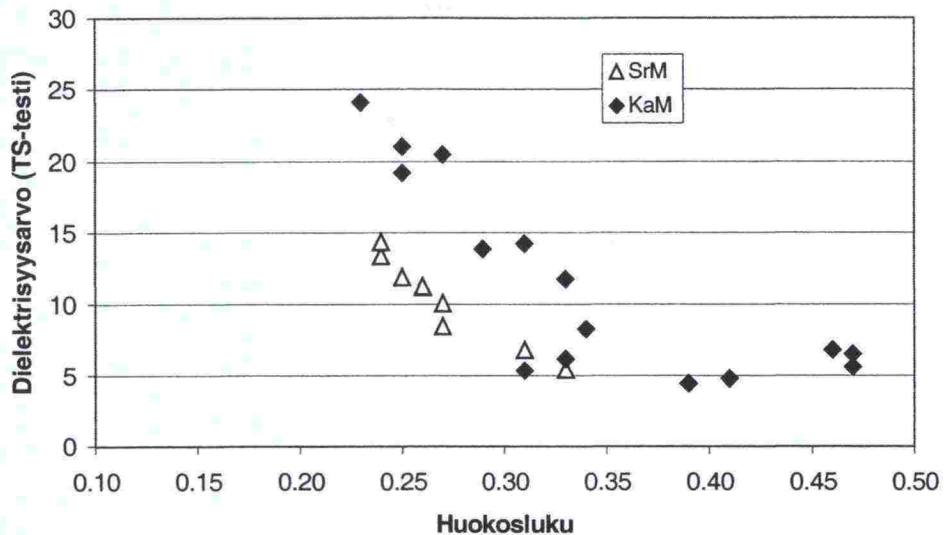




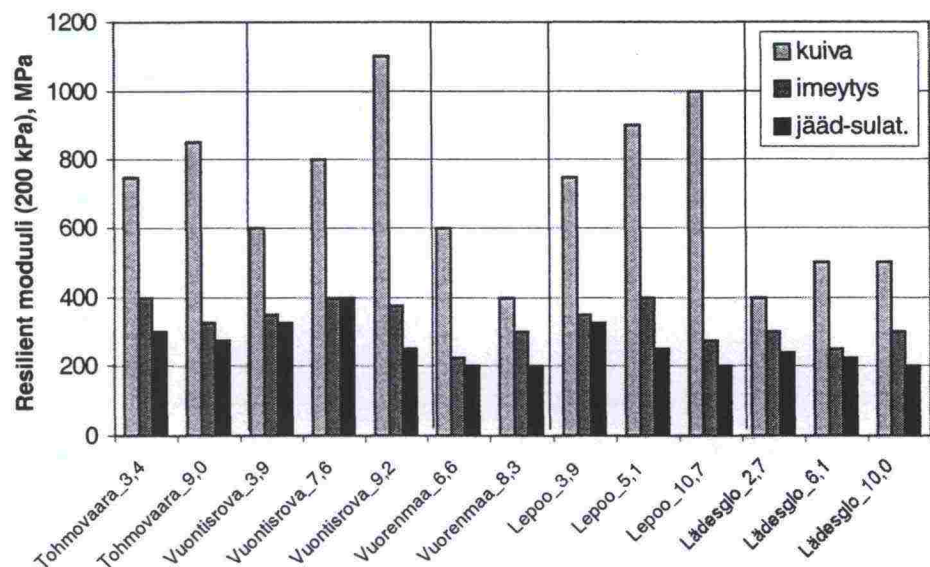
Kuva 1. Hienoainespitoisuuden (<0.074 mm) ja vesipitoisuuden suhde TS-testissä tutkituilla sora- ja kalliomurskeilla. Kuva osoittaa, että tietyllä hienoainemäärällä murskeeseen imeytynyt kosteus voi vaihdella noin 2 %-yksikköä. Soramurskeilla vaihtelu on pienempää ja näytteen vesipitoisuus voidaan likimäärin arvioida kaavasta:  $0,27 \cdot \text{hienoainespit.} + 3,0 \%$ . Kalliomurskeilla vesipitoisuus voi olla soramurskeiden vesipitoisuuteen verrattuna pienempi tai suurempi riippuen siitä, mikä on kalliomurskeen huokostilavuus sekä materiaalin osmoottisen imupaineen taso. Suhteessa eniten vettä imivät kiillerikkaat kalliomurskeet. Kuvassa on niinkään tarkasteltu bitumipitoisuuden vaikutusta Lepoon ja Lädesglon kalliomurskeiden TS-testin jälkeiseen vesipitoisuuteen. Kuva osoittaa, että 5 % hienoainesta sisältävällä Lepoon murskeella jo 2 % bitumipitoisuus riittää estämään veden imeytymisen, mutta Lädesglon murskeella vastaava arvo on yli 3 %.



Kuva 2. Hienoainespitoisuuden suhde TS-testin avulla määritettyyn dielektrisyysarvoon tutkituilla sora- ja kalliomurskeilla. Kuva osoittaa, että tutkituilla soramurskeilla hienoainespitoisuuden ylittäessä 5 % rajan, imevät murskeet vettä jo niin paljon, että ongelmallisten murskeiden raja-arvo 9 ylittyy. Huonolaatuilla kalliomurskeilla raja voi ylittyä jo alle 4 %:n hienoainespitoisuuksilla.

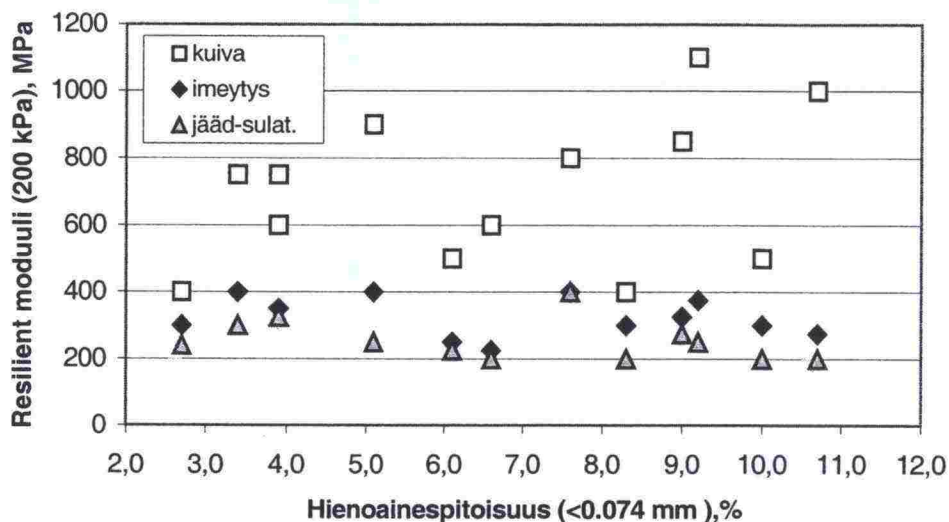


Kuva 3. TS-testin dielektrisyysarvon suhde näytteiden huokoslukuun tutkituilla sora- ja kalliomurskeilla. Kuva osoittaa, että hyvin tiivistyneillä murske-näytteillä aineksen kapillaarisuus kasvaa, mikä näkyy selkeästi volumetrista vesipitoisuutta kuvaavassa dielektrisyysarvossa. Soramurskeet imivät vettä eri huokostilavuuksilla selvästi vähemmän kuin suurin osa kalliomurskeista, joissa kemialliset prosessit vastamurskatuilla raepinnoilla aiheuttavat suuremman osmoottisen imupaineen osuuden.

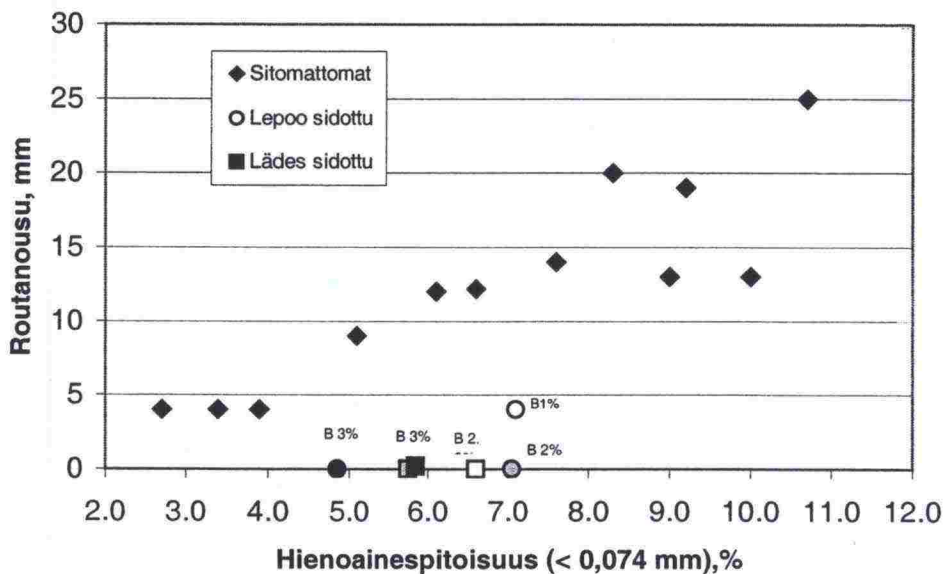


Kuva 4. Dynaamisten kolmiakselialikokeiden tulokset vuodelta 1998. Lädesglon 2.7 % hienoainespitoisuuden omaava näyte tutkittiin uudelleen vuonna 1999. Kuvasta nähdään, että Vuorenmaan näytettä lukuunottamatta hienoaines-määrän kasvaessa kuivan näytteen moduuli-arvot kasvavat. Sen sijaan kosteissa näytteissä ja jäädytys-sulatussyklin läpikäyneissä näytteissä moduuli-arvot alenevat hienoainesmäärän kasvun myötä.

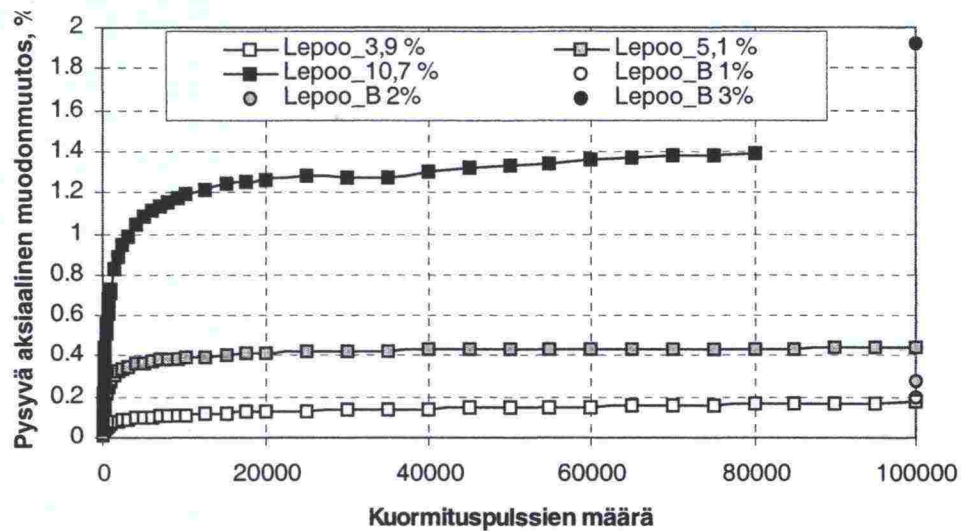




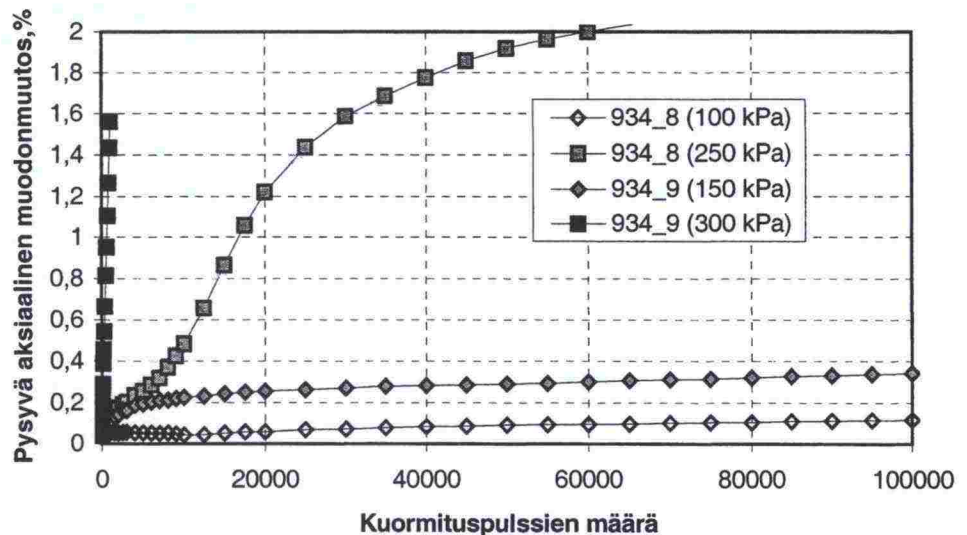
Kuva 5. Hienoainespitoisuuden vaikutus kuivan, imeytetyn ja jäädytys-sulatussyklin läpikäyneiden murskeiden resilient -moduuliarvoihin 200 kPa suuruisella pääjännityssumman arvolla. Kaikki tutkitut näytteet olivat kalliomurskeita.



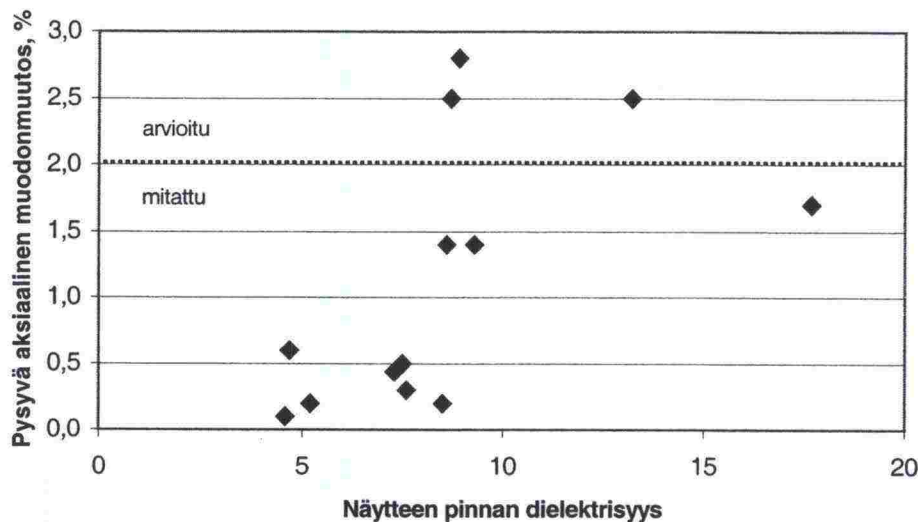
Kuva 6. Hienoainespitoisuuden suhde näytteestä jäädytyskokeessa mitattuun routanousuun. Kokeessa mitattiin selkeää routanousua jo hieman yli 5 % hienoainespitoisuudella ja hienoainesäärällä näytti olevan selkeä korrelaatio mitattujen routanousujen suuruuteen. Kuva osoittaa myös, että bitumistabilointi on estänyt routanousun lähes täysin.



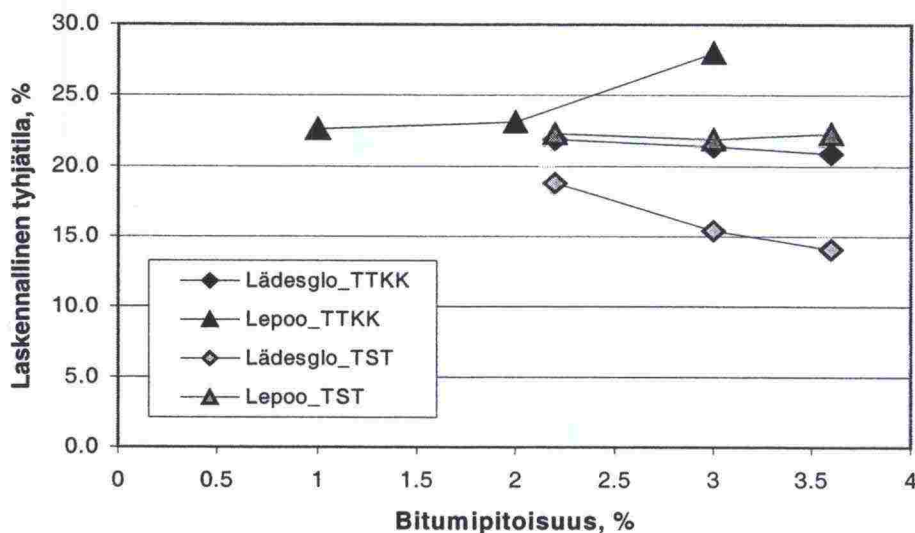
Kuva 7. Lepoon kalliomurskeen hienoainespitoisuuden vaikutus murskeessa kuormitussarjan aikana tapahtuviin pysyviin muodonmuutoksiin. Hienoaines määrä nosto kasvattaa selkeästi muodonmuutosten suuruutta. Kuvassa on esitetty myös bitumilla sidottuista näytteistä mitatut pysyvät muodonmuutokset 100 000 kuormituspulssin jälkeen. Suurimmat muodonmuutokset mitattiin 3 % bitumipitoisuuden omaavalla näytteellä, jonka tiivistys ei onnistunut (ks. myös kuva 12). Kokeissa käytetty sellipaine oli 50 kPa ja aksiaalinen kuormitus oli 300 kPa.



Kuva 8. Jäädytys-sulatussyklin jälkeen tapahtuneet palautumattomat muodonmuutokset Vuorenmaan normaalirakeisuuden omaavalla murskeella eri laisilla aksiaalisen kuormituksen arvoilla. Tulokset osoittavat selkeästi jännitystiloihin olevan suuren vaikutuksen materiaalissa tapahtuviin pysyviin muodonmuutoksiin. Vuorenmaan tapauksessa vaadittaisiin vähintään noin 200 mm sidottuja kerroksia murskeen päälle, jotta varmistettaisiin ettei materiaalissa pääse tapahtumaan merkittäviä pysyviä muodonmuutoksia.

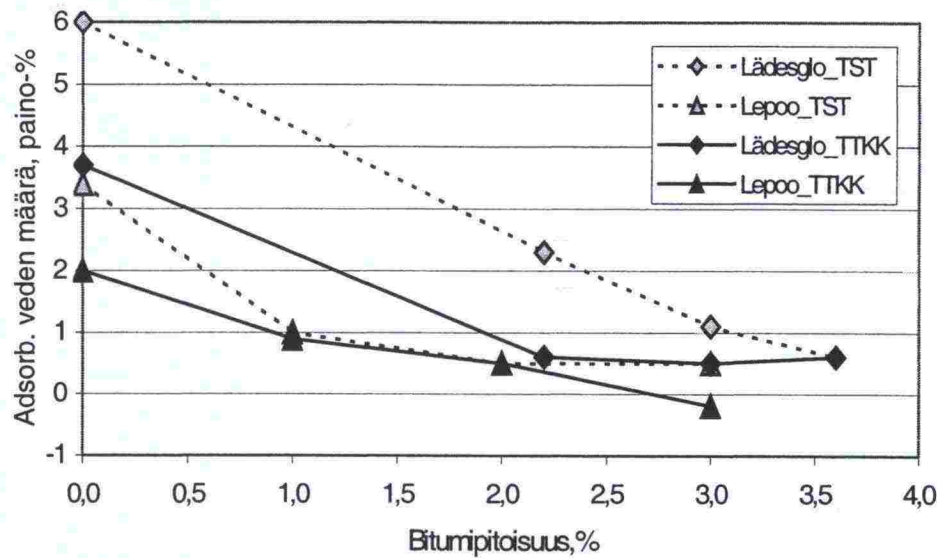


Kuva 9. TTKK:n kokeissa imeytyksen jälkeen näytteen pinnasta mitatut dielektrisyysarvot ja niiden suhde jäädytys-sulatuskokeen jälkeisessä syklisessä kuormituskokeessa mitattuihin pysyviin muodonmuutoksiin. Yli 2 % muodonmuutosarvot ovat likimääräisiä. Tulokset osoittavat, että suurimpia pysyviä muodonmuutoksia mitattiin näytteillä, joiden dielektrisyysarvo oli yli 8. TTKK:n kokeissa dielektrisyysarvot ovat hieman pienempiä kuin TS-testissä mitatut, koska näytteen korkeus oli 400 mm TS-testissä käytetyn 200 mm asemesta.

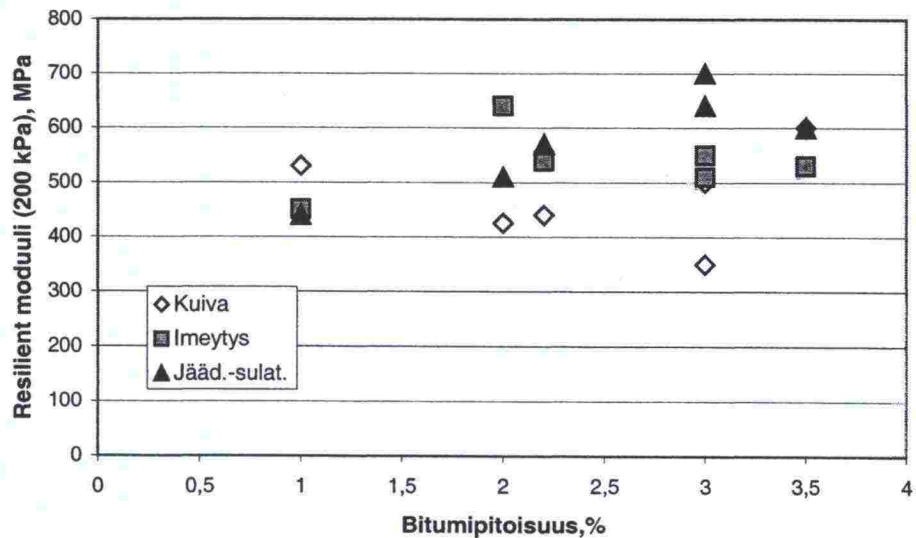


Kuva 10. Bitumipitoisuuden suhde stabiloitujen murskeiden tyhjätilaan 60°C:ssa kiertotiivistimellä tiivistetyssä (TST) ja 20°C:ssa täryllä tiivistetyssä emulgoidulla bitumilla stabiloiduissa näytteissä (TTKK). Kuva osoittaa, että korkeammassa lämpötilassa kiertotiivistimellä tiivistettyjen näytteiden tyhjätilat ovat 1-5 % pienemmät kuin TTKK:n laboratoriossa huoneenlämpötilassa tiivistetyillä näytteillä. Kuva osoittaa myös, että bitumipitoisuuden lisääminen pienentää tyhjätiloja Lädesglon murskeella, mutta Lepoon murskeella tyhjätilat kasvoivat suuremmilla bitumipitoisuuksilla molemmilla tiivistystekniikoilla.



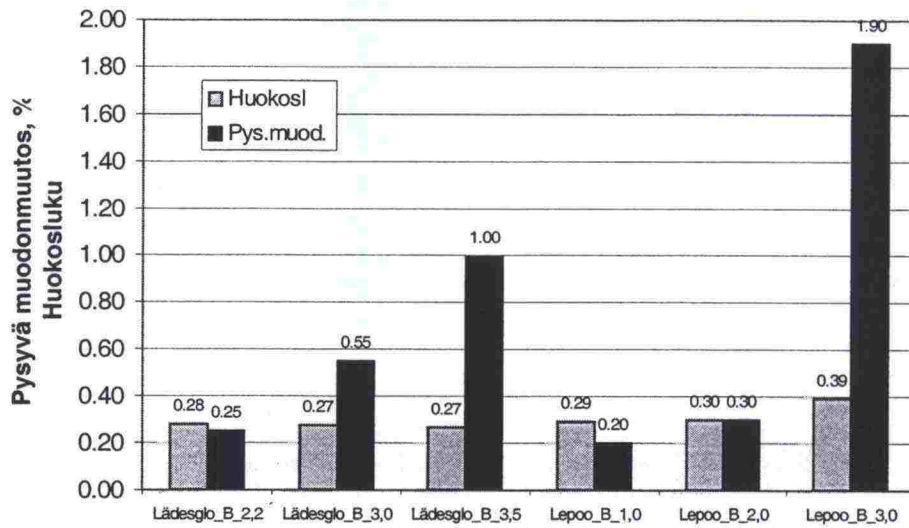


Kuva 11. Bitumipitoisuuden vaikutus TS-testin aikana näytteeseen imeytyneeseen vesipitoisuuteen sekä TTKK:ssa näytteen kuivatusta seuranneessa imeytysvaiheessa mitattuun vesipitoisuuden muutokseen. TS-testissä Lepoon murskeessa veden imeytyminen näytteeseen estyy kokonaan 2,5 – 3,0 % bitumipitoisuudella, kun taas Ladesglon murske vaatii vähintään 3,5 % bitumia, jotta veden imeytyminen täydellisesti estyy. Sen sijaan TTKK:n kokeissa imeytysvaiheessa Ladesglon näytteisiin imeytyneissä vesimäärissä ei ollut merkittävää eroa bitumipitoisuuden kasvaessa 2,2 prosentista 3,5 prosenttiin. Lepoon näytteissä vesipitoisuus pieneni bitumipitoisuuden kasvaessa ollen estynyt 3 % bitumipitoisuudessa.



Kuva 12. Bitumipitoisuuden vaikutus murskenäytteiden resilient-moduuleihin kuivana sekä imeytyksen ja jäädytys-sulatussyklin jälkeen.





Kuva 13. Lepoon ja Lädesglo:n stabiloitujen näytteiden huokosluvut ja pysyvät muodonmuutokset  $10^5$  kuormituspulssin pituisella koesarjalla, jossa aksiaalisen kuormituspulssin suuruus oli 300 kPa ja sellipaine 50 kPa. Kuva osoittaa, että molemmissa näytteissä pysyvät muodonmuutokset kasvavat bitumipitoisuuden kasvaessa. Lepoon 3% bitumipitoisuuden omaavan murskeen huomattavasti suuremmat pysyvät muodonmuutokset selittyvät näytteen huonolla tiiviysasteella (huokosluku 0,39).

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimusprojektin tulokset osoittivat selkeästi, ettei suomalaisilla murskeilla ongelmana ole niinkään murskeen resiliient -ominaisuudet ja niiden vuoden-aikaisvaihtelut, vaan kantavassa kerroksessa pääasiassa keväällä roudan sulamisvaiheessa syntyvät pysyvät muodonmuutokset. Tutkimuksen tulokset tukevat myös vahvasti sitä olettamusta, että pysyvät muodonmuutokset syntyvät kun pulssimaisen liikennekuormitus aiheuttaa syksyllä ja talvella jäätymisvaiheessa vettä itseensä imeneeseen murskeeseen huokosveden ylipainetta, joka puolestaan alentaa maarakeiden välillä vaikuttavia tehokkaita jännityksiä ja voi johtaa jo muutaman kymmenen kuormituspulssin jälkeen materiaalisissa tapahtuvaan plastiseen deformaatioon. Siksi merkittäviä muodonmuutoksia voi kantavassa kerroksessa tapahtua keväällä kriittisenä aikana jo muutaman raskaan ajoneuvon ylityskerralla.

Murskeessa syntyvien pysyvien muodonmuutosten määrään vaikuttaa selkeästi näytteen imupaineominaisuudet, jotka ovat pääasiassa näytteen hienoainespitoisuuden funktio, mutta joihin vaikuttavat myös näytteen kemialliset ominaisuudet. Tutkimusprojektin kemiallisissa tutkimuksissa todettiin, että ongelmalliset murskeet sisälsivät erilaisia mineraalisia ja amorfisia kolloidiyhdisteitä, joiden roolia muodonmuutosten syntyprosessissa ei kuitenkaan tässä vaiheessa vielä voitu selvittää. Syntyvien muodonmuutosten määrään vaikuttaa niinkään ratkaisevasti myös näytteessä vallitseva jännitystila ja projekti tuottikin tietoa jännityssuhteista, joiden ylittyessä materiaalisia alkaa kehittyä merkittäviä pysyviä muodonmuutoksia. Tämän tiedon perusteella voidaan arvioida esimerkiksi ongelmallisen murskeen päälle tarvittavien sidottujen kerrosten paksuutta.

Tutkimusprojektin osoitti myös, että sitomattomissa kantavan kerroksen murskeissa voi syntyä routanousua ja sen määrä korreloi hyvin hienoaineksen määrän kanssa. Routanousua mitattiin jo 5 % hienoainespitoisuuksilla. Routanousun määrä ei kuitenkaan suoraan korreloi murskeeseen sulamisen jälkeen kohdistettavan toistokuormituksen yhteydessä tapahtuvien pysyvien muodonmuutosten kanssa vaan kriittinen tekijä on se, poistuu vesi murskeesta roudan sulamisvaiheessa vai ei.

Sitomattomien murskeiden resiliient -moduulit kesäkautta edustavissa kuivissa näytteissä kasvoivat selkeästi hienoainespitoisuuden funktiona. Sen sijaan syksyn olosuhteita simuloivilla kosteilla näytteillä ja kevään roudan sulamisvaihetta kuvaavilla, jäädytys-sulatussyklin läpikäyneillä, näytteillä moduuliarvot alenivat hienoainesmäärä kasvaessa. Tulokset vahvistivat vanhat havainnot, että teiden kantavuuden mittaus kuivimpina kesäkuukausina ei välttämättä ole järkevää, koska huonolaatuisten murskeiden moduulit ovat tällöin korkeat. Kantavuusmittauksia tulkittaessa tulisikin muistaa, että jos kantavuudet ovat huonot, tiessä on aina ongelmia, mutta jos kantavuudet ovat hyvät, voivat tien rakennekerrosten materiaalit olla joko hyviä tai erittäin huonoja.

Tutkimusprojektin tulokset osoittivat, että edellä kuvattujen ongelmallisten murskeiden tunnistamiseen kehitetty imupainekoe eli TS-testi toimii hyvin. Sen avulla voidaan arvioida onko kyseisen rakeisuuden omaava murske routiva ja onko se altis pysyville muodonmuutoksille, mutta sillä voidaan arvioida myös kuinka paljon murskeen rakeisuutta tulisi muuttaa, jotta sitä



voitaisiin hyödyntää päällysrakennekerroksissa. Jos murske joudutaan stabiloimaan, TS-testin avulla voidaan myös arvioida tutkittavan sideaineen toimivuutta ja tarvittavaa määrää. TS-testin tulokset osoittivat niinikään, että soramurskeet imevät keskimäärin vähemmän vettä kuin kalliomurskeet, joissa on enemmän vasta murskattua raepintaa, joka on altis reagoimaan veden kanssa.

Projektin yhteydessä emulgoidulla bitumilla stabiloiduilla näytteillä tehdyt kokeet tuottivat myös mielenkiintoisia tuloksia. Yllättävin tulos oli se, että bitumipitoisuuden lisäys ei aina paranna stabiloidun murskeen ominaisuuksia vaan esimerkiksi Lädesglon kalliomurskeella tilanne oli päinvastainen: pienemmät muodonmuutokset mitattiin alimmalla 2,2 % bitumipitoisuudella eikä näytteen resiliient moduulikaan ollut tällöin merkittävästi heikompi kuin korkeamman bitumipitoisuuden omaavilla näytteillä. Kokeiden tulokset osoittivat myös, että jos kantavan kerroksen murske stabiloidaan kylmänä, on kerroksen tiivistämiseen kiinnitettävä erityistä huomiota ja jos tiivistyksen tuloksesta ei voida olla varmoja esimerkiksi tien pohjamaan heikon kantavuuden vuoksi, ei bitumipitoisuutta kannata kasvattaa "varmuuden vuoksi". Jos näytteessä on riittävästi bitumia niin että veden imeytyminen murskeeseen estyy ja massan työstettävyyys säilyy, ei bitumipitoisuuden nostolla saavuteta ainakaan lyhytaikaista etua.

Tämän tutkimuskokonaisuuden tulokset osoittivat selkeästi, että Suomessa kriittisin tekijä kantavan kerroksen murskeiden toiminnan kannalta on siinä oleva vapaan veden määrä. Kun veden imeytyminen kantavaan kerrokseen saadaan estettyä, ei kerroksessa pitäisi tapahtua suuria palautumattomia muodonmuutoksia. Tulokset osoittivat myös, että jatkossa ainakaan keski- ja alempiluokkaisten teiden sekä parannettavien rakenteiden mitoitus ei pitäisi tehdä pelkästään materiaalin elastiseen käyttäytymiseen pohjautuvia malleja käyttäen, vaan materiaalin visko-elastinen ja visko-plastinen käyttäytyminen tulisi myös ottaa huomioon.

## 5 KIRJALLISUUSVIITTEET

- Carpenter, S.H. and Lytton, R.L. (1977). Thermal pavement cracking in West Texas. Texas Transportation Institute Research Report 18-4F, Study 2-8-73-18. Texas A&M University, College Station, Texas. 232 s.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. Wiley, New York, 517 s.
- Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Väitöskirja, Tampereen teknillinen korkeakoulu, julkaisu numero 223. 216 s.
- Saarenketo, T. (1995). Using electrical methods to classify the strength properties of Texas and Finnish base course aggregates. Center for Aggregates research, 3<sup>rd</sup> Annual Symposium Proceedings, Austin, Texas. 19 s.
- Saarenketo, T. (1999). Road analysis, an advanced integrated survey method for road condition evaluation. Proceedings of the Cost Workshop on Modelling and Advanced testing for unbound and Granular Materials. Balkema, ss. 125-133.
- Saarenketo, T. (2000). Tube Suction Test – Result of round robin tests on unbound aggregates. Tielaitos, Lapin tiepiiri, Julkaisuja (painossa).
- Saarenketo, T. and Scullion, T. (1995). Using electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates. TTI Research Report 1341-2. 71 s.
- Saarenketo, T. and Scullion, T. (1996). Laboratory and GPR tests to evaluate electrical and mechanical properties of Texas and Finnish base Course Aggregates. Proc. of 6<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, Sendai, Japan, ss. 477-482.
- Saarenketo, T., Scullion, T. and Kolisoja, P. (1998). Moisture susceptibility and electrical properties of base course aggregates. Proceedings of BCRA'98, Vol. 3, July 6-8, Trondheim, Norway, ss. 1401-1410.
- Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Yliheikkilä, T. & Ylitapio, S. (2000). Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet, Osa I: Sitomattomat materiaalit. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio, julkaisu numero 51. 71 s. + 37 liites.
- Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., & Ylitapio, S. (2000). Kantavan kerroksen murskeen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet, Osa II: Bitumilla sidotut materiaalit ja jännitystilän vaikutus sitomattomien materiaalien pysyviin muodonmuutoksiin. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio, julkaisu numero 51. 42 s. + 20 liites.



- Scullion, T. and Saarenketo, T. 1997. Using suction and dielectric measurements as performance indicators for aggregate base materials. Transportation Research Record 1577, ss. 37- 44.
- Titus-Glover, L. and Fernando, E. G. 1995. Evaluation of pavement, base and subgrade material properties and test procedures, Report 1335-2, Texas Transportation Institute, College Station, Texas.
- Yliheikkilä, T. 1998. Kemiallisen koostumuksen vaikutus murskeiden vedenherkkyyteen. Pro Gradu tutkielma, Oulun yliopisto, Kemian laitos, 108s. + 3 liites.
- Ylitapio, S. 1997. TS-testin käyttö sitomattomien ja bitumilla sidottujen murskeiden laadun arvioinnissa. Insinööritö, Rovaniemen Teknillinen oppilaitos, 37 s.

ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-728-2  
TIEH 3200657